

筋電位を制御信号とした機能的電気刺激システムによる麻痺手の動作再建

著者	半田 勉
号	2593
発行年	1993
URL	http://hdl.handle.net/10097/20984

氏 名（本籍） はん だ つとむ
半 田 勉

学 位 の 種 類 博 士 （ 医 学 ）

学 位 記 番 号 医 第 2 5 9 3 号

学位授与年月日 平 成 5 年 9 月 8 日

学位授与の条件 学位規則第 4 条第 2 項該当

最 終 学 歴 昭 和 60 年 3 月 20 日
信州大学医学部医学科卒業

学 位 論 文 題 目 筋電位を制御信号とした機能的電気刺激システム
による麻痺手の動作再建

（主 査）

論 文 審 査 委 員 教授 半 田 康 延 教授 櫻 井 実

教授 丹 治 順

論文内容要旨

【目 的】

脊髄損傷や脳卒中などで中枢性運動ニューロンが障害された場合でも、麻痺した筋を支配する末梢の運動ニューロン (α -motor neuron) が残存していれば、電気刺激を与えることによって、その支配筋は収縮する。この原理を応用して、麻痺した四肢の運動機能を再建する方法は、機能的電気刺激 (Functional Electrical Stimulation : FES) と呼ばれている。近年の研究によって、小型の多チャンネル FES 装置が開発されるとともに、患者の限られた残存機能を利用して、患者自身がこの装置を操作するための制御信号入力装置も、いくつか報告されている。その一つに筋電位を利用する方法がある。これまでの報告では、表面電極を使用し、導出された筋電位を全波整流後、平滑化処理を行った値 (積分筋電位 : Integrated Electromyogram : IEMG) を制御信号に使用していた。しかし、この信号処理方法では、麻痺筋に与えた電気刺激が artifact となって、刺激近傍の筋を信号源とすることはできなかった。

そこで、刺激部近傍の筋の筋電位を制御信号としても、電気刺激による artifact に影響されることなく、目的動作を筋電位に比例して制御し得る FES システムの開発を目的として、健常人13名で基本動作の確認を行い、C6四肢麻痺患者2名について、麻痺手の把持力制御を検討した。

【装置と方法】

短橈側手根伸筋 (M. Extensor Carpi Radialis Brevis : ECRB) の筋腹中央に双極の導出用電極を刺入留置し、絶縁型差動増幅器、band-pass filter (cut off 周波数 200Hz-1000Hz)、入力値調整用増幅器を接続した。得られた信号は、12ビット A/D コンバーターでサンプリング (サンプリング周波数 2.5kHz) した。この信号を基に制御用のコンピューター (NEC, PC9801, 東京) で刺激パルスの振幅 (刺激強度) を決定し、刺激出力装置から、幅 0.2msec、繰り返し周波数 20Hz の負性矩形波を、振幅変調で、麻痺筋の motor point に出力した。サンプリングは、50msec 毎に出力される各刺激パルス出力直前の一定時間内 (sampling window) で行い、ソフトウェアで全波整流後、積分した。さらに、その値の16点の移動平均値 (Integrated Electromyogram through the window : IEMGw) を、刺激強度を調節するための制御信号とした。

上記の装置を使用し、健常被検者 6 名 (21才~28才) について、刺激パルスを印加した場合に ECRB から導出される電位変化を測定した。また、健常被検者 7 名 (20才~28才) で、手根背屈

力 (Torque of wrist extension : Twe) と ECRB の筋電位をランプ、および、ステップ動作を行わせて測定した。

次に、C6四肢麻痺の男性患者2名(24才, 47才)について、ECRBの筋電位を制御信号としたFESシステムで、麻痺した手指の屈曲を制御させた。刺激用電極は深指屈筋 (M. Flexor Digitorum Profundus : FDP) に刺入留置し、制御時の手根背屈力 Twe と手指の屈曲力 (Torque of finger flexion : Tff) について測定した。

【結 果】

刺激パルスの出力開始から刺激パルスが消失するまでの時間は、導出用電極・刺激用電極間距離が短いほど、増加したが、最大でも3.0msecであった。また最も遅い電位変化を示したH波でも、約20msec以内に消失した。明瞭なF波は全被検者で導出されなかった。以上から、sampling windowの時間幅を16msecに設定することで、刺激パルスによる電位変化の影響を受けずに、ECRBの筋電位を導出可能であることがわかった。また、健常人では、手根背屈力 Twe と ECRB の IEMGw は、高い相関を示し、全被検者でのランプ動作での相関係数は0.930 ($p<0.01$) だった。

次に、C6四肢麻痺患者で、上記システムによって麻痺手の制御を行わせた結果、sampling windowによる信号処理を行った場合には、刺激によるartifactの影響はほとんど見られず、手根背屈力 Twe と IEMGw の関係は、健常人の場合と同様に、高い相関 ($r=0.910$, $p<0.01$) を示した。しかし、刺激による手指の屈曲力 Tff が、非線形に増加していたため、完全には比例的な制御ができなかった。

【考 察】

筋内埋め込み電極を使用し、さらに、筋電位の導出方法として sampling window を使用したことにより、FESの刺激によるartifactの影響を受ける事なく、刺激筋近傍の筋である ECRB の筋電位を制御信号とすることが可能となった。さらに、刺激出力による手指の収縮力が線形となるように改善することで、筋電位による比例的な制御が可能になると考えられた。また、埋め込み電極から安定した信号が導出できる筋電位は、FESの制御信号として十分な特性をもつことが確認され、将来的に小型の体内に埋め込み型 FES 装置が開発された場合にも使用し得る、有用な信号源であると考えられた。

審 査 結 果 の 要 旨

本論文は、有効な治療法が確立されていない頸髄損傷による完全四肢麻痺患者を対象にして、その上肢機能を機能的電気刺激（Functional Electrical Stimulation : FES）によって再建するという、世界最先端の研究をおこなったものである。特に、麻痺上肢への FES の分野では、患者の意思にそって上肢を随意的に動かすための制御命令を、患者のどの部位からどのような方法で得るかが、重要かつ難解な問題として捉えられている。本論文は、この点に関して、患者自身の筋電信号を制御命令として用いるという独自の解決策を見いだしている点で新規性がある。

すなわち、医学、工学の発展にともなって、高性能な多チャンネル FES 装置が開発されているにもかかわらず、患者がこの装置を随意的に操作するための、制御命令源とその検出装置についての研究は、相対的に遅れていた。しかし本論文によって、患者の残存機能を有効に利用した制御命令の獲得方法の一つが明らかにされた。すなわち、患者の麻痺手を制御する上で、機能の残存している筋（ここでは手根の背屈筋）の筋電位を利用する場合、従来の報告では、刺激パルスによる artifact を筋電位から除去する方法に、難点があった。

本論文提出者は、この artifact を除去する上で、工学的方法を巧みに利用した新たな方法を考案し、基礎的検討を加え、ほぼ完全に筋電位のみを導出する方法を確立している。しかも、単なる基礎実験に終わることなく、この方法で、四肢麻痺患者の手の動作再建に適用して、制御命令として基本的に応用可能であることを確認している。すなわち、手根の背屈による tenodesis grip を補強する形での、手指の把持動作の FES による随意制御に成功している。また、一方、本手法を実用化する上での問題点をも明確に論述しており、今後の研究方向を示唆している点でも、評価できると思われる。

以上のように、本論文は、内容的に十分な価値のあるものであり、さらに、将来の発展性を考慮しており、博士論文として承認できるものと考ええる。